

プ ラ ズ マ  
パ ル ス パ ワ ー 合 同 研 究 会 資 料  
放 電

The Papers of Joint Technical Meeting on  
Plasma Science and Technology, Pulsed Power  
Technology and Electrical Discharges, IEE Japan

資 料 番 号	P S T - 1 3 - 4 2
	P P T - 1 3 - 2 7
	E D - 1 3 - 3 2

## 水中へのパルスパワー注入による動物プランクトンの不活化

今田 剛<sup>\*</sup>、磯貝 誠、覚張 隆人  
(新潟工科大学)

2 0 1 3 年 5 月 1 6 日

一般社団法人 電 気 学 会  
The Institute of Electrical Engineers of Japan  
東 京 都 千 代 田 区 五 番 町 6 - 2

# 水中へのパルスパワー注入による動物プランクトンの不活化

今田 剛\* 磯貝 誠 覚張 隆人 (新潟工科大学)

Inactivation of Zooplankton by Injection of Pulsed Power into Water  
Go Imada\*, Makoto Isokai, Takato Gakuhari (Niigata Institute of Technology)

Micro bubbles are produced by injection of a pulsed power into water. Shock wave generated by burst of the bubbles affects the life of spawn and larva of zooplankton in the water. A large number of bubbles and the bubbles in small diameter are effective for the inactivation of the zooplankton. The number density and diameter of produced bubbles are estimated to be  $10\text{--}20\text{ mm}^{-2}$  and  $20\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$ , respectively. We found that 99 % of the spawn of artemia is inactivated by firing 1 shot of the pulsed-power injection. On the other hand, 98 % of the larva of artemia is inactivated by firing 800 shots of the pulsed-power injection.

キーワード：パルスパワー、動物プランクトン、不活化、衝撃波  
(Pulsed power, Zooplankton, Inactivation, Shock wave)

## 1. はじめに

海洋環境保全のため、船舶バラスト水中の菌類および水生微生物やその卵の処理装置の開発は急務である<sup>(1)</sup>。ここで、プロペラ等によるキャビテーションで発生させた微細泡が破裂する際の衝撃波の利用も処理法の一つとして提案されている<sup>(2)</sup>。さて、大電力を媒質中に注入すると衝撃波の発生することが知られている。また、媒質として液体を用いると気泡の発生する場合がある。我々はパルスパワー技術を利用して、水中にて直径が数十 $\mu\text{m}$ の微細泡を多量に生成し、水中微生物の処理を試みた。微細泡の発生特性および水中微生物(動物プランクトン、アルテミア)の幼生と卵の不活化特性を吟味した。

## 2. パルスパワー注入による水中の動物プランクトンの不活化の概念

図1に水中へのパルスパワー注入による動物プランクトンの不活化の概念を示す。パルスパワーを水中に注入すると、電極間の限られた空間内に高エネルギー密度状態が生成される。これにより水が瞬時に加熱気化され、直径が数十 $\mu\text{m}$ オーダーの微細泡を多量に発生する。この泡が破裂する際に発生する衝撃波が動物プランクトンに照射され、細胞壁を破壊し不活化させる。泡径が小さくなると表面積あたりの内圧が高くなり、破裂時の衝撃波が強くなる<sup>(2)</sup>。また、パルスのエネルギーを注入することより、効率的な不活化が期待できる。

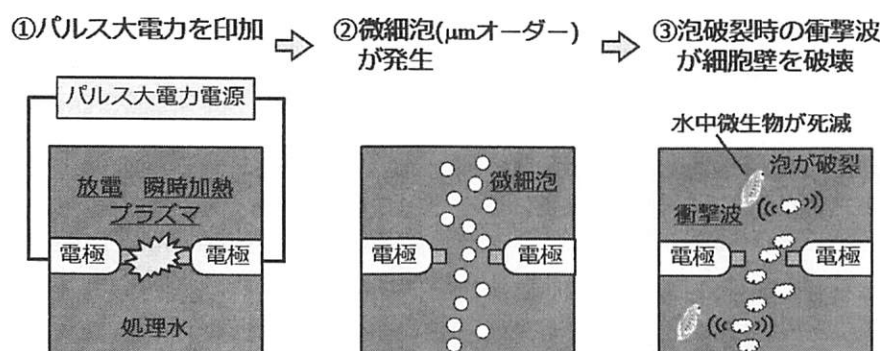


図1 不活化の概念

Fig. 1 Concept of inactivation.

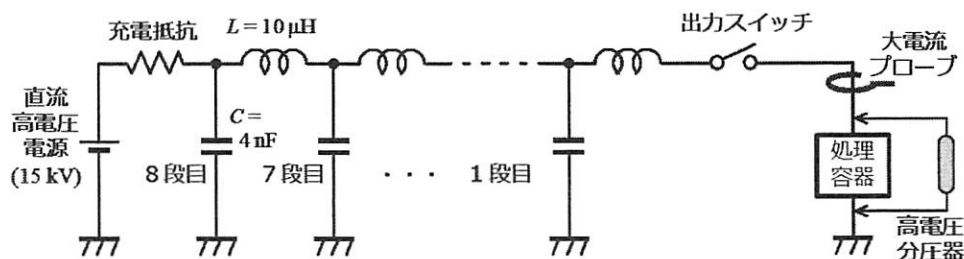


図3 パルスパワー電源の回路図

Fig. 3 Electrical circuit of pulsed power supply.

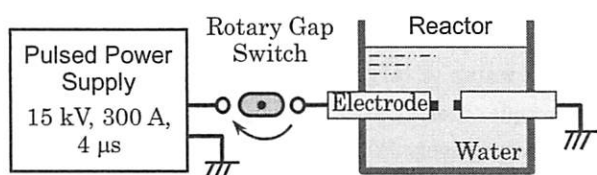


図2 不活化装置概略図

Fig. 2 Treatment setup.

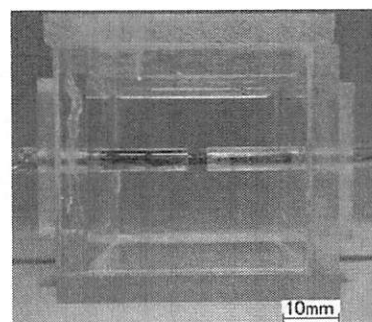


図5 処理容器

Fig. 5 Reactor.

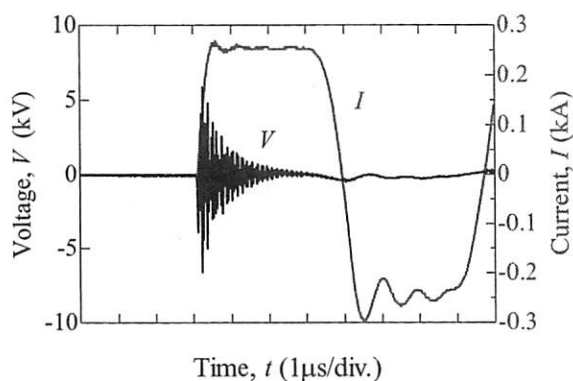
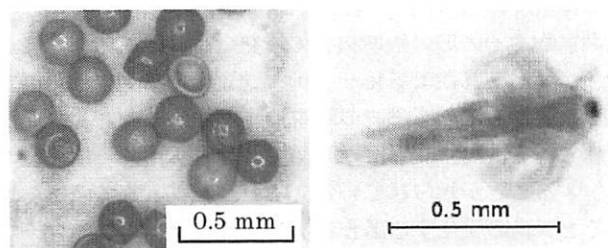


図4 パルスパワー電源の短絡負荷特性

Fig. 4 Current and voltage of pulsed power supply in short load.



(a) 乾燥卵 Dry spawn

(b) 幼生 Larva

図6 アルテミア

Fig. 6 Artemia.

### 3. 実験装置

〈3・1〉 不活化装置 図2は不活化装置の概略図である。パルスパワー電源からのパルスパワーをロータリーギャップスイッチにより約3.3 s間隔で処理容器中の電極間に注入する。処理容器に処理水およびアルテミアの幼生または卵が投入される。

〈3・2〉 パルスパワー電源 図3にパルスパワー電源を示す。8段のPFN (Pulse Forming Network) で、各段は  $C = 4 \text{ nF}$  の高圧セラミックコンデンサと  $L = 10 \text{ μH}$  の空芯インダクタンスで構成される。処理水に注入される電流および処理容器の電極間電圧は、それぞれ、大電流変流器

(PEASON 社、Model 441c)および高電圧分圧器(パルス電子技術株式会社、EP-50K)で観測し、デジタルオシロスコープ(LeCroy 社、WeveJet314)で記録する。コンデンサの充電電圧は、その定格電圧が20 kVであることを考慮して、15 kVまでとした。1パルス当たりの充電エネルギーは  $3.6 \text{ J} = 1 \times 10^{-6} \text{ kWh}$  と僅かである。

図4に負荷を短絡した場合の電流および電圧を示す。0.25 kAの電流を4 μs (FWHM) 間、流すことができる。

〈3・3〉 処理容器 図5は処理容器の外観を示す。容器は、微細泡が十分に広がるよう、幅40 mm、奥行40 mm、深さ40 mmの大きさとした。これらの寸法はアルテミアの体長や卵の径と比較すると十分に大きい。電極は容器底面

から 15 mm の位置に設置し、電極間距離は 0.24 mm である。電極には直径 2.4 mm の銅棒を用いており、アクリルパイプの絶縁物に覆われている。泡の広がりやその分布を写真撮影により評価できるように、容器は透明のアクリル板で製作した。

処理水は、海水を模擬して、カルキ抜きをした水道水に食塩を 3.5 wt% 添加した。この処理水 50 g を容器中に注水した。

〈3・4〉 アルテミア 不活化実験では、動物プランクトンとしてアルテミアを使用した。図 6 は (a) アルテミアの乾燥卵および (b) 孵化直後のアルテミアの幼生である。アルテミアは節足動物 (甲殻類、ミジンコ綱) で、主に塩水湖に生息しており 25 % の強塩水でも生息可能である。その卵は乾燥や冷凍にも耐え、25 °C 前後の塩水に投入すると約 1 日で孵化する。なお、アルテミアによる海洋環境への影響は報告されていないが、本研究では、その生命力の強さに着目して不活化実験の対象に選定した。

〈3・5〉 不活化の判定 卵の不活化は、その孵化率  $\varepsilon$  にて判定した。幼生が殻を破り卵から出かけているが運動性が認められない個体は、孵化とは計数しない。孵化率  $\varepsilon$  の算定式を以下に示す。

$$\varepsilon = \frac{\text{パルスパワー注入後、卵を塩水に投入し} \\ \text{26 時間後までに孵化した卵の数}}{\text{処理容器に投入した卵の総数}} \quad (1)$$

幼生の不活化は、その運動性の有無を光学顕微鏡で目視観測して、判定した。多少なりとも動いている個体は生存とし、1 分間、観察しても動かない個体は不活とする。不活化率  $\eta$  の算定式を以下に示す。

$$\eta = \frac{\text{パルスパワー注入後、} \\ \text{運動性を失った幼生の数}}{\text{処理容器に投入した幼生の総数}} \quad (2)$$

#### 4. 水中へのパルスパワー注入による微細泡の発生

〈4・1〉 パルスパワーの注入特性 図 7 は PFN 段数が 8 段における典型的な電極間の電流および電圧である。パルスパワーの注入にともない電極間電圧は上昇し、その後、1.1  $\mu$ s の間、1.3 kV 程度の電圧が維持され、約 0.18 kA の電流が流れている。したがって、この期間における電極間抵抗は 7  $\Omega$  となる。一方、処理水の塩分濃度および電極寸法から算定した抵抗は 9.6  $\Omega$  であり、両者がほぼ等しいことから、この期間はジュール加熱により水へのエネルギー注入が行われているものと思われる。なお、ジュール加熱による水温上昇を計算すると、処理水全体では 0.001 K の上昇、電極間のみが加熱されたとしても 0.1 K の上昇に留まり、熱による動物プランクトン等の不活化の可能性は低いものと考えられる。ジュール加熱の期間が過ぎると、電極

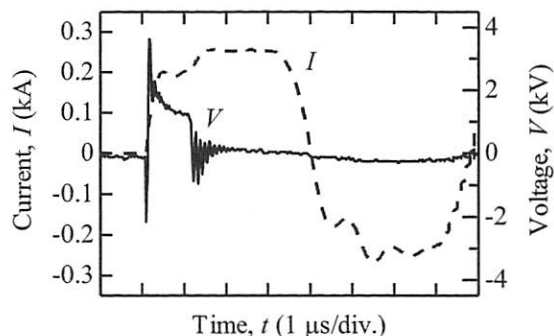
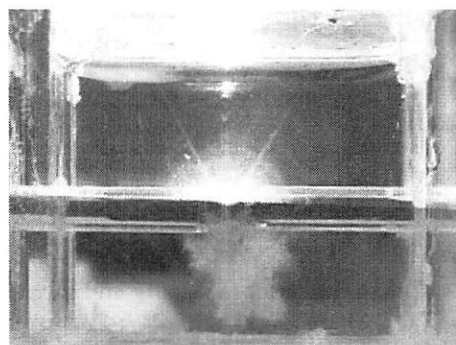


図 7 電極間の電流および電圧 (PFN 段数 8 段)

Fig. 7 Typical current and voltage at electrode (PFN stages : 8).



(a) 泡の広がり Expansion of bubble



(b) 泡の詳細 Detail of bubble

図 8 微細泡の発生

Fig. 8 Production of micro bubble.

間電圧は急激に低下し短い周期で振動している。これと同時に電流が増大していることから、電極間で絶縁破壊が起こり、放電の発生したものと考えられる。

〈4・2〉 パルスパワー注入による微細泡の発生 図 8 は PFN 段数が 8 段における典型的な微細泡の発生状況である。同図 (a) はパルスパワー注入直後の泡の広がりを示す。白いもや状に微細泡の一群が観測されている。当該実験装置では、微細泡は電極から下方方向に広がる傾向が見受けら

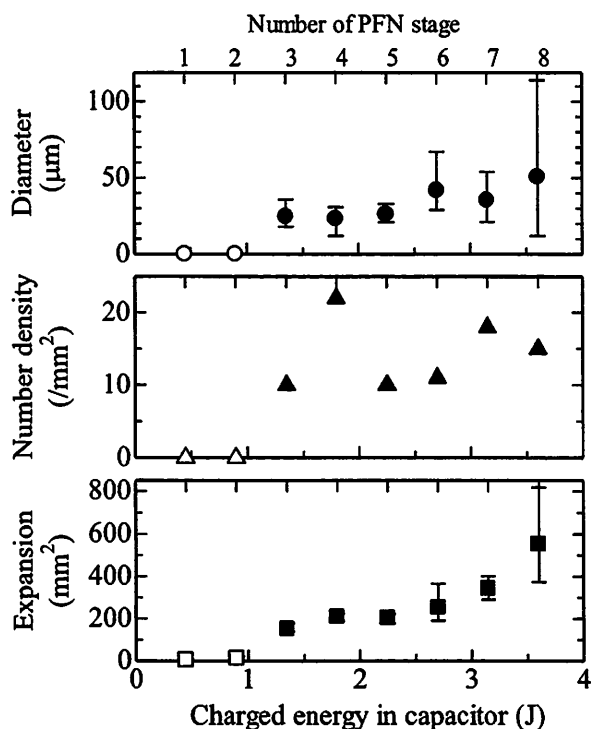


図9 微細泡の直径、数密度および存在範囲の PFN 段数(コンデンサ充電エネルギー)依存性

Fig. 9 Diameter, number density and expansion of micro bubbles as a function of number of PFN stage (charged energy of capacitor).

れたが、その理由は現在のところ不明である。時間とともに微細泡は電極の上方方向にも拡散していき、次のパルスパワー注入が行われる 3.3 s 後には処理水の全体にわたり分布した。同図(b)は顕微鏡で拡大撮影した微細泡である。バックライトを照射し、泡の輪郭を強調している。直径が数十  $\mu\text{m}$  の微細泡の発生が確認できた。

図9は微細泡の直径、数密度および存在範囲の PFN 段数(コンデンサ充電エネルギー)依存性である。なお、PFN 段数が2段以下では、微細泡の発生は極めて僅かであった。PFN 段数が3~7段の範囲では、微細泡の直径は30  $\mu\text{m}$  前後である。PFN 段数を8段としエネルギーを大きくすると、微細泡の直径のバラツキが大きくなり、平均直径も大きくなる。微細泡の数密度(パルスパワー注入から1s後)とPFN 段数との相関関係は弱く、観測範囲1  $\text{mm}^2$  当たり体積積算で10~20個の微細泡が観測された。微細泡の存在範囲(パルスパワー注入から1s後)はPFN 段数を増やすとともに増大している。処理容器において水が注入されている断面積は幅40  $\text{mm}$  × 深さ30  $\text{mm}$  = 1200  $\text{mm}^2$  であるので、PFN 段数が8段のとき約半分の領域に微細泡が拡がっていることになる。直径と同様に、PFN 段数を8段とすると存在範囲のバラツキが大きくなっている。PFN 段数8段においては各ショット毎に電極間の絶縁破壊に至る時間に違いがあ

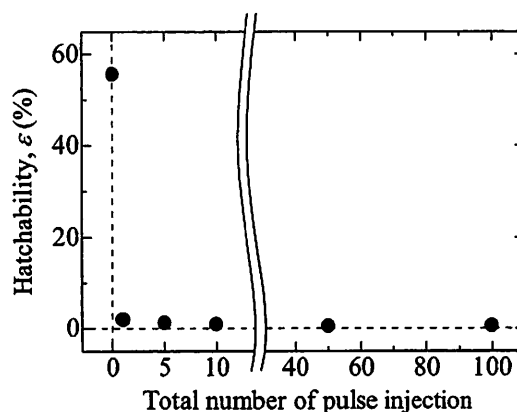


図10 アルテミアの卵の孵化率の パルスパワー注入回数依存性

Fig. 10 Hatchability of spawn of artemia as a function of number of pulsed-power injection.

り、これが直径および存在範囲のバラツキの発生の原因の1つと考えられる。泡の数密度、存在範囲および処理容器の寸法から、アルテミアの幼生を処理水中に250匹、放流した場合、幼生1匹あたり数十個程度の微細泡が存在するものと見積もられる。

## 5. アルテミアの卵および幼生の不活化

〈5・1〉 卵の不活化 図10はアルテミアの卵の孵化率のパルスパワー注入回数依存性である。処理水中に約500個の卵を投入してパルスパワーを注入し、その後、卵を回収し孵化用の塩水(塩分濃度3.5 wt%)に投入し26時間後までの孵化状況を目視観察した。実験条件を同一にするため、パルスパワーを注入しない場合においても、一旦、卵を処理水に投入し、パルスパワー注入時間に相当する時間の経過後に回収し孵化用の塩水に投入している。なお、卵と微細泡の遭遇機会が増え不活化が効果的に行われるように、PFN 段数は泡の存在範囲が広い8段とした。

パルスパワーを注入していない場合、孵化率は56%である。一般にアルテミアの孵化率は70~90%であるが、本実験では冷蔵保存期間が1年を経過した乾燥卵を使用したため、若干、孵化率が低くなっている。なお、孵化した幼生は鮮やかなオレンジ色の体色で、体長は0.5  $\text{mm}$  程度で水中を活発に泳ぎ回っている。また、孵化途中の幼生も卵の殻の外に出るため活発に身体を動かしている様子が観察された(図11参照)。

一方、パルスパワーを注入すると、孵化率は急激に低下する。1回のパルスパワー注入で孵化率は2%程度となり、注入を10回以上積算すると1%以下となった。すなわち、数回のパルスパワー注入で、ほぼ全ての卵を不活化できることがわかる。なお、わずかに孵化した幼生は体色が薄く動作も緩慢であり、また、卵の殻の外に出かけている幼生

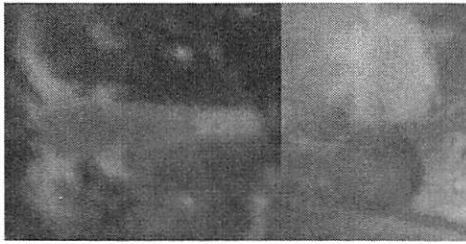


図 1 1 パルスパワーを注入しない場合の  
アルテミアの卵の孵化

Fig. 11 Hatching of spawn of artemia  
without pulsed-power injection.

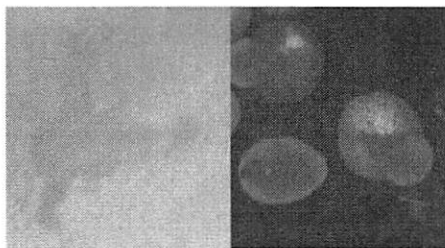


図 1 2 パルスパワーを注入した場合の  
アルテミアの卵の孵化

Fig. 12 Hatching of spawn of artemia  
with pulsed-power injection.

もあるが、それらは動きを止めており割れた殻から漏れ出てきた様子である(図 1 2 参照)。1 回目のパルスパワー注入時におけるパルスパワー電源のコンデンサの充電エネルギーに対する不活化された卵の数、すなわち、処理エネルギー効率は 2.7 億個/kWh にも達する。

〈5・2〉 幼生の不活化 図 1 3 はアルテミアの幼生の不活化率のパルスパワー注入回数依存性である。処理水中に孵化直後の幼生を約 250 匹、放流してパルスパワーを注入し、その後、各個体の運動性を観察した。なお、PFN 段数は 8 段である。パルスパワー注入回数に比例して不活化率が上昇していき、800 回の注入で 98 % の幼生を不活化することに成功した。処理水中を幼生が自由に泳ぎ回ることができるため、パルスパワー注入毎に幼生の存在位置が変わる。そのため、幼生と微細泡の遭遇確率は空間的にも時間的にも偏りが生じず、不活化率がパルスパワー注入回数に比例するものと考えられる。ここで、800 回分のパルスパワー電源の積算充電エネルギーから、処理エネルギー効率は 30 万匹/kWh と見積もられる。

さて、パルスパワー注入を重ねていくと、処理水に薄青色の着色や細かい粒子状の沈殿物が見受けられた。これらは、銅製の電極を使用していることに起因すると思われる。酸化による緑青の生成やスパッタによる電極材の飛散であ

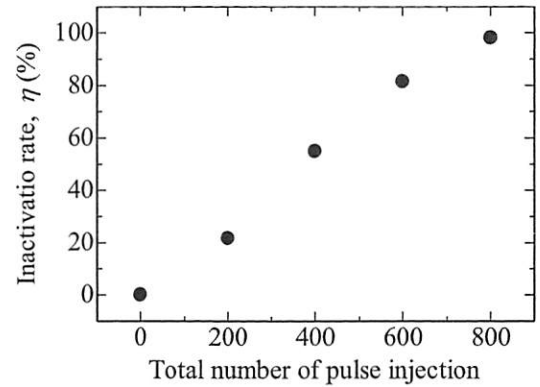


図 1 3 アルテミアの幼生の不活化率の  
パルスパワー注入回数依存性

Fig. 13 Inactivation rate of larva of artemia as a  
function of number of pulsed-power injection.

表 1 800 回のパルスパワー注入した処理水での  
アルテミアの幼生の不活化率

Table I Inactivation rate of larva of artemia  
in treatment water with 800 shots of  
pulsed-power injection.

Released larva	Inactivated larva	Inactivation rate, $\eta$ (%)
231	0	0
222	1	0.5
247	0	0

る。緑青は人体に対して毒性はないが、この処理水の変化によりアルテミアの幼生が不活化している可能性を吟味するため、幼生を投入せずに 800 回のパルスパワー注入を行った処理水を用意し、それに幼生を放流・放置した場合の不活化率を調べた。表 1 は放流・放置 2 時間後の不活化率を示す。不活化率はほぼ 0 で、この処理水の変化は不活化に影響を及ぼさないことがわかる。すなわち、微細泡の効果による不活化が支配的であると思われる。

〈5・3〉 卵と幼生の不活化特性の比較 卵では 1 回のパルスパワー注入でほぼ全ての個体を不活化できたが、幼生では 800 回の注入を要した。処理容器に卵を投入すると、吸水した乾燥卵は必然的に容器の底部に滞留する。図 8 に示したとおり本実験装置では微細泡が電極から下方向に拡がる傾向があるため、容器底部の卵と微細泡の遭遇確率が高まり、効果的に不活化されたものと考えられる。一方、幼生は処理水中を自由に泳ぎ回るため、微細泡との遭遇確

率が低くなり、不活化には多数回のパルスパワーの注入を要したと思われる。

## 6. まとめ

水中へのパルスパワー注入により生成した微細泡による動物プランクトンの処理を試み、アルテミアの卵および幼生の不活化に成功した。

不活化特性のメカニズムの解明および最適化が今後の課題である。

## 謝辞

実験にご協力いただいた新潟工科大学・卒業生 佐藤康平氏、河村 健氏に謝意を表します。

## 文 献

---

- (1) GloBallast, <http://globallast.imo.org/>
- (2) 阿部ら：第 56 回応用物理学関係連合講演会・講演予稿集、106 (2009)